

振動輸送における物体の挙動

井 沢 実

The Behaviour of the Conveying Material on the Oscillating Conveyor

Minoru IZAWA

Synopsis

The method of the oscillating conveyor which feeds the material by means of putting it on the sinusoidally oscillating plate, is commonly applied in manufacturing fields, because the equipment is very simple and, makes the various operations such as selection, arrangement, etc. of machine parts, for example, possible.

In the conveyance process under condition that the amplitude of the vibrating plate is constant, the material slides on the surface of the plate when the frequency of vibration is small.

On the other hand, if the frequency exceeds a certain value, then the material jumps up from the surface of the plate.

In this paper, these behaviours of conveying materials during sliding and jump motion under various operating conditions, have been studied theoretically and experimentally.

As these results, the good coincidence of the conveying speeds between theoretical analysis and experimental works were confirmed.

Moreover, the paths of motion of the conveying material recorded experimentally were compared with that calculated analytically and their differences were discussed.

ま え が き

振動する面上に物体をのせて輸送する振動輸送法は、簡単な機構の装置によって連続的に物体の輸送が可能ならえ、さらにその輸送途中において、物体の選別あるいは整列作業なども行なわせることが可能であり、生産設備の省力化、自動化にとってかなり有効な方法と考えられ、

振動コンベア、振動フィーダ、振動エレベータ、振動テーブルなど種々の形で広い分野に応用されている。輸送に際して、輸送物体は振動輸送板上で滑り運動だけを行なう場合と、とび上り運動と滑り運動とを繰り返して行なう場合とがあるが、これらは種々の物体のそれぞれの輸送目的や輸送条件によって選択されなければならない問題である。

このような振動輸送に関する研究としてはすでにいくつかのものが発表されている。^{1),2),3)} また、著者らはすでに、滑り運動による物体の輸送運動の理論解析ならびに種々の物体についての各種条件のもとでの輸送速度に関する実験結果を報告した。そこで、本報では前報に引続き物体を水平輸送する振動コンベアについて、とび上り運動を含む物体運動の理論解析を行ない、さらに種々の条件のもとでの実験を行ない、物体の輸送速度ならびに撮影記録した物体の運動軌跡を理論式から計算した値とそれぞれ比較し、検討を加えた結果を報告する。

1. 輸送物体の運動理論

輸送物体の運動は、輸送板の最大垂直加速度が重力の加速度 g 以下の領域と g 以上の領域とによって、その挙動は全く異なってくる。すなわち、 g 以下の領域では滑り運動のみで物体は移動し、 g 以上の領域では滑り運動ととび上り運動とを交互に行ないながら移動することになる。したがって、両領域についてはそれぞれ別個に検討する必要がある。

1.1 輸送板の運動

輸送物体の運動理論の誘導に先立って、輸送板の運動について述べておく。輸送板面は振動中、つねに水平状態を保持しながら図 1 に示すように $P_1 \sim P_2$ 間を運動する。このような輸送板にコイルバネおよび板バネを取付けた点 M は、板バネの長さを半径としてその支点を中心とする円弧 $L'MN'$ を画いて振動するが、板バネの長さに比べてその振幅は小さいから、 M は近似的に直線 LMN 上で振動しているものと考えてよい。

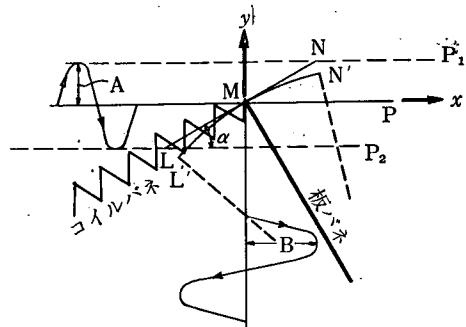


図 1 輸送板の振動状況

いま、直線 LMN が水平面に対してなす傾斜角を α とし、板バネの振幅を a (cm)、振動数を n (cpm) とすれば、点 M を原点とした固定座標 x, y に対して、輸送板の垂直、水平両方向の振動はそれぞれ次式で表わすことができる。

垂直方向振動

$$\text{変位} \quad y = A \sin \omega t$$

$$\text{速度} \quad y = A \omega \cos \omega t$$

$$\text{加速度} \quad y = -A \omega^2 \sin \omega t$$

水平方向振動

$$\text{変位} \quad x = B \sin \omega t$$

$$\text{速度} \quad x = B \omega \cos \omega t$$

$$\text{加速度} \quad x = -B \omega^2 \sin \omega t$$

$$\text{ここで} \quad A = a \sin \alpha, \quad B = a \cos \alpha, \quad \omega = \frac{\pi n}{30}$$

1.2 輸送物体の運動理論

(a) 輸送板の最大垂直加速度が g 以下の場合

この場合の物体は、常に輸送板と接触しながら板に対して前向きあるいは後向きの滑り運動を生じ、これらの前滑り運動と後滑り運動の差によって物体は空間に対して前進運動することになる。このような場合の物体の運動理論に関してはすでに前報で詳細に報告したが⁴⁾、本報では後章で引用する関係上、関連する若干の結果式のみを記しておくことにする。

まずはじめに、物体が前滑り運動をはじめる時刻 t_{01} は

$$t_{01} = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{\mu_0 g}{\omega^2 (B + \mu_0 A)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで μ_0 : 輸送板に対する物体の静摩擦係数

で求められる。このような前滑り運動に対して、輸送板上で物体が静止していた点を変位の原点にとり、任意の時間後における物体の水平方向座標を x_1 とすると、 x_1 は次式のように求められる。

$$x_1 = (B + \mu A) (-\sin \omega t_1 + \omega t_1 \cos \omega t_{01} + \sin \omega t_{01} - \omega t_{01} \cos \omega t_{01}) - \frac{1}{2} \mu g (t_1 - t_{01})^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで μ : 輸送板に対する物体の動摩擦係数

そこで、輸送板に対する物体の前滑り距離を S_1 とすれば、 S_1 は

$$S_1 = [x_1]_{t_1=t_{s1}} \quad \text{ここで } t_{s1} : \text{前進運動が停止する時刻}$$

となるから、式(2)を用いて

$$S_1 = (B + \mu A) (\sin \omega t_{s1} + \omega t_{s1} \cos \omega t_{01} + \sin \omega t_{01} - \omega t_{01} \cos \omega t_{01}) - \frac{1}{2} \mu g (t_{s1} - t_{01})^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

が求められる。

次に、時刻 t_1 が $\frac{\pi}{\omega} < t_1 < \frac{2\pi}{\omega}$ の領域では、物体に働く慣性力がその前進方向と逆向きになるから、物体は後滑り運動する可能性を発生する。いま、物体の後滑り運動に対して、前滑り運動の時刻 $t_1 = \frac{\pi}{\omega}$ を時間の原点にとることとし、そこからの時間 t_2 を考えることにする。後滑り運動が始まる時刻を t_{02} とすれば、 t_{02} は

$$t_{02} = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{\mu_0 g}{\omega^2 (B - \mu_0 A)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で求められる。

前滑り運動の場合と同様に、後滑り運動が停止する時刻を t_{s2} とすれば、後滑り距離 S_2 は

$$S_2 = [x_2]_{t_2=t_{s2}}$$

で求まるから、式(2)を用いて

$$S_2 = (B - \mu A) (-\sin \omega t_{s2} + \omega t_{s2} \cos \omega t_{02} + \sin \omega t_{02} - \omega t_{02} \cos \omega t_{02}) - \frac{1}{2} \mu g (t_{s2} - t_{02})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。

そこで、以上から、輸送板の振動の1周期中における物体の前進距離 S は

$$S = S_1 - S_2 \dots\dots\dots (6)$$

で求められる。

(b) 輸送板の最大垂直加速度が g 以上になる場合、

この場合の物体は、輸送板と接触している間は静止しているかあるいは前向きもしくは後向きの滑り運動を行なっているが、輸送板の垂直加速度が g に等しくなったとき板から離れてとび上り、放物線を書いて飛行した後板上に落下して再び滑り運動を発生する。したがって、このような場合における物体は、輸送板に対する前後滑りと空間飛行の混合によって前進することになる。

はじめ物体が板に対して静止しているものとすれば（その点を座標の原点にとる）、物体の慣性力と最大静摩擦力とが等しくなる時刻において物体は前向きに滑り始める。この時刻 t_{01} は式(1)と全く同様なものとなる。

次いで振動する輸送板の垂直加速度が g に等しくなったとき、物体は次式によって板から離れてとび上り始める。すなわち

$$\ddot{y} = -g \dots\dots\dots (7)$$

いま、物体がとび上り始めるまでの時間を t_1' とすれば、 t_1' は

$$t_1' = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{g}{A\omega^2} \dots\dots\dots (8)$$

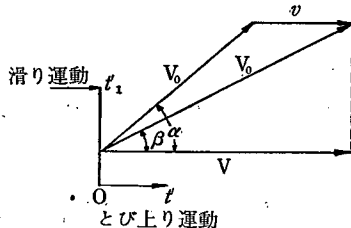


図2 とび上りのときの速度

で求められる。この場合、物体はすでに前滑り速度を持っているから、これと t_1' における輸送板の速度 V_0 との合成速度 V_0' をもって空間に放出される。 v , V_0 , V_0' の関係は図2に示す。ここで、 v および V_0 はそれぞれ次式のように求められる。

$$v = (B + \mu A)\omega(\cos\omega t_{01} - \cos\omega t_1') + \mu g(t_{01} - t_1') \dots\dots\dots (9)$$

$$V_0 = a\omega\cos\omega t_1' \dots\dots\dots (10)$$

また、 t_1' を時間原点にとった場合、それから t' 時後における物体は次式で示す放物線を書き板の運動とは無関係に空間を飛行する。

$$\left. \begin{aligned} x &= V_0' t' \cos\beta = V t' \\ y &= V_0' t' \sin\beta - \frac{1}{2} g t'^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで β : V_0' が水平方向となす角

放出された物体はその後再び板上に落下するが、輸送板は物体の飛行中も運動しているから、板と物体の垂直方向変位が等しくなったとき物体は板上に落下接触する。その時刻を t'_{s1} (前滑り運動の原点から測った時刻) とすれば、

$$A\sin\omega t_{s1}' = A\sin\omega t_1' + V_0'(t_{s1}' - t_1')\sin\beta - \frac{1}{2} g(t_{s1}' - t_1')^2 \dots\dots\dots (12)$$

となる。

t_{s1}' 時における物体の板に対する水平速度 V' は各水平速度の相対速度として与えられ

$$V' = V_0' \cos \beta - B \omega \cos t_{s1}' \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。また、 t_{s1}' 時において物体に働く慣性力が最大静摩擦力より大ならば、物体は板上に落下すると同時に前滑り運動を発生し、その運動中のある瞬間（時刻 t とする）における速度は次式で与えられる。

$$\dot{x}_1 = \omega(B + \mu A)(\cos \omega t_{s1}' - \cos \omega t) + \mu g(t_{s1}' - t) + V' \quad \dots\dots\dots (14)$$

この前滑り運動は慣性力と動摩擦力との差力によって制動作用を受け、 $\dot{x}_1 = 0$ になったとき板上に静止する。いま、その時刻 t_{s2}' をとすると、 t_{s2}' は次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \cos \omega t_{s2}' &= K' - K t_{s2}' \\ \text{ここで } K &= \frac{\mu g}{\omega(B + \mu A)} \\ K' &= \cos \omega t_{s1}' + K t_{s1}' + \frac{V'}{\omega(B + \mu A)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

したがって、時刻 t_{s1}' より t_{s2}' の間の物体の前滑り距離 S_2' は

$$\begin{aligned} S_2' &= (B + \mu A)(-\sin \omega t_{s2}' + \omega t_{s2}' \cos \omega t_{s1}' + \sin \omega t_{s1}' - \omega t_{s1}' \cos \omega t_{s1}') \\ &\quad - \frac{1}{2} \mu g (t_{s2}' - t_{s1}')^2 + V'(t_{s2}' - t_{s1}') \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

となる。

また、時刻 t'_{s2} における物体の慣性力が最大静摩擦力より大きい場合には物体は後滑り運動を始め、時刻 t'_{s3} において静止する。 t'_{s3} 時は前と同様にして次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \cos \omega t_{s3}' &= K' - K t_{s3}' \\ \text{ここで } K &= \frac{\mu g}{\omega(B - \mu A)} \\ K' &= \cos \omega t_{s2}' + K t_{s2}' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

そこで、この場合の後滑り距離 S_3' は

$$\begin{aligned} S_3' &= (B - \mu A)(-\sin \omega t'_{s3} + \omega t_{s3} \cos \omega t_{s2}' + \sin \omega t_{s2}' - \omega t_{s2}' \cos \omega t_{s2}') \\ &\quad - \frac{1}{2} \mu g (t'_{s2} - t'_{s3})^2 \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

（ただし、座標は後滑り方向を正とし、上述の前滑りの場合の $\frac{\pi}{\omega}$ のときを時間の原点にとる。）

で求められる。

以上の解析において、滑り運動の範囲では板との相対移動距離が求められており、一方、空間飛行に対しては板の位置に無関係に絶対距離が求められているから、板の振動の周期に対応する物体の板上での前進距離を求めるためには、飛行距離を板に対する相対距離で表わす必要がある。

板の水平方向変位は1.1節で述べた通り

$$x_p = B \sin \omega t$$

ここで x_p : 飛行距離の水平成分 x との混同を避けるため、ここでは板の水平変位を x_p で表わす。

であるから、物体が飛行している間の板の水平方向移行距離 S_p は

$$S_p = B \sin \omega t_1' - B \sin \omega t_{s1}' \dots\dots\dots (19)$$

となる。

したがって、物体の輸送板に対する相対水平飛行距離 S_f は式(11), (19)から

$$S_f = x + S_p = V_0'(t_{s1}' - t_1') \cos \beta + B(\sin \omega t_1' - \sin \omega t_{s1}') \dots\dots\dots (20)$$

のようになる。

ところで、 t_{01} 時より t_1' 時までの前滑り距離 S_1' は前節の式(2)を用いて

$$S_1' = (B + \mu A)(-\sin \omega t_1' + \omega t_1' \cos \omega t_{01} + \sin \omega t_{01} - \omega t_{01} \cos \omega t_{01}) \\ - \frac{1}{2} \mu g (t_1' - t_{01})^2 \dots\dots\dots (21)$$

のように求まるから、結局、物体のとび上り運動を含む場合の、輸送板振動の1周期中における物体の前進距離 S' は

$$S' = S_1' + S_f + S_2' - S_3' \dots\dots\dots (22)$$

ここで S_1' : とび上り前の前滑り距離

S_f : 板に対する飛行距離

S_2' : 板に落下後の前滑り距離

S_3' : 後滑り距離

として求めることができる。

2. 実験装置と実験方法

実験装置には図3に示す小型の振動コンベアを使用した。本装置における輸送板は前述したように厳密には正弦運動を行なわないが、板バネの長さ200mmに比べてその振幅を8mmとして実験を行なったから、ほぼ正弦運動を行なうものと考えて差支えない。

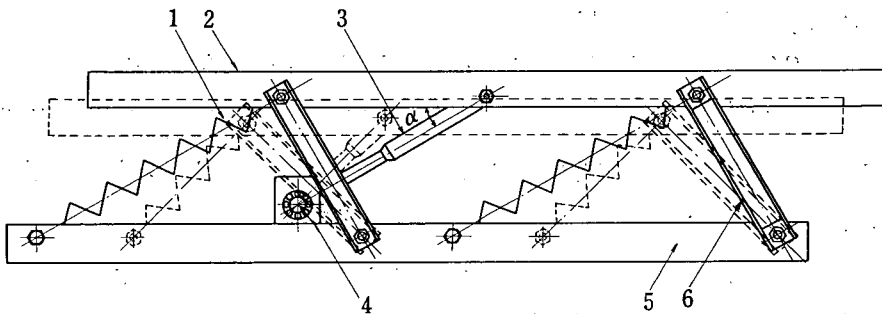


図3 実験装置

- | | | |
|----------|---------|--------|
| 1. コイルバネ | 2. 輸送板 | 3. 連接棒 |
| 4. クランク | 5. フレーム | 6. 板バネ |

輸送物体には直径50mm、厚さ10mm、重量159gの軟鋼製円板を使用し、一方、輸送板の表面には模造紙ならびに合成ゴム板を接着して、輸送物体との間に大きさのかなり異なる2種類の摩擦係数が得られるようにした。

輸送物体の運動軌跡の記録には、物体上に豆電球を固定しておき暗室中でその挙動を撮影する方法を採用した。また、輸送速度の測定には輸送板上を物体が70cm進む時間を測定し、そ

の結果から算出する方法を採用した。

実験条件は輸送板の振動数を 250cpm から 600cpm の範囲で変化し、さらに輸送板面が板バネの振動方向となす角 α を 30, 35, 45° の 3 通りに変化して、以上の諸条件をいろいろに組合わせながら実験を行なった。

3. 摩擦係数の測定

輸送物体と輸送板間の静摩擦の測定には図 4 に示す方法を用い、物体が動き始めるときのおもり荷重から静摩擦係数 μ_0 の値を算出することにした。測定結果は表 1 に示す。

表 1

測定回数	模造紙着板の場合		合成ゴム接着板の場合	
	最大静摩擦力 (g)	静摩擦係数 μ_0	最大静摩擦力 (g)	静摩擦係数 μ_0
1	52.5	0.33	120	0.75
2	47.5	0.30	116	0.73
3	51.5	0.33	114	0.72
4	50.5	0.32	125	0.79
5	50.5	0.32	117	0.74
6	51.5	0.33	116	0.73
7	52.5	0.33	117	0.74
8	52.5	0.33	119	0.75
9	48.5	0.31	119	0.75
10	50.0	0.31	115	0.72
平均値	50.75	0.32	117.8	0.74

次に動摩擦の測定は静摩擦測定と同じ図 4 の装置を用い、適当なおもり荷重を作用させて物体を輸送板上で 70cm 滑らせたときの滑り時間を測定し、その結果から次式を用いて算出することとした。

$$F - \mu W = \frac{W}{g} \ddot{x} \dots \dots \dots (23)$$

ここで F : おもり荷重

W : 輸送物体の重量

μ : 動摩擦係数

x : 移動距離

上式を積分すると

$$\frac{1}{2} t^2 (F - \mu W) = \frac{W}{g} x + c_1 t + c_2$$

$t=0$ で $x=0$, $\dot{x}=0$ の条件から, $c_1=0$, $c_2=0$ となるから, 上式より

$$\mu = \frac{F}{W} - \frac{2x}{gt^2} \dots \dots \dots (24)$$

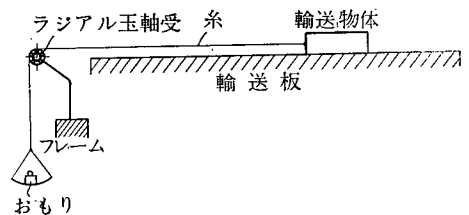


図 4 摩擦係数測定法

表 2 すべり時間の測定値

測定回数	模造紙接着板 の場合	合成ゴム接着 板の場合
	すべり時間 (sec)	すべり時間 (sec)
1	1.7	1.4
2	1.7	1.3
3	1.6	1.4
4	1.4	1.4
5	1.5	1.3
6	1.6	1.3
7	1.7	1.2
8	1.5	1.4
9	1.6	1.3
10	1.6	1.3
11	1.4	1.4
12	1.3	1.2
13	1.6	1.3
14	1.5	1.3
15	1.7	1.3
16	1.6	1.0
17	1.6	1.2
18	1.6	1.3
18	1.6	1.3
20	1.6	1.2
平均値	1.57	1.29

が求められる。すべり時間の測定結果は表 2 に示す。そこで、式(24)を用いて計算した動摩擦係数は次のようになった。

模造紙接着板の場合

すべり時間の平均値 = 1.57(sec)

$$W = 159(\text{g})$$

$$F = 53(\text{g})$$

$$x = 70(\text{cm})$$

$$\mu = 0.275$$

合成ゴム接着板の場合

すべり時間の平均値 = 1.29(sec)

$$W = 159(\text{g})$$

$$F = 95(\text{g})$$

$$x = 70(\text{cm})$$

$$\mu = 0.511$$

4. 輸送物体の運動機構

4.1 輸送板の最大垂直加速度が g 以下の場合

輸送板に対する物体の摩擦係数を $\mu_0 = 0.32$,

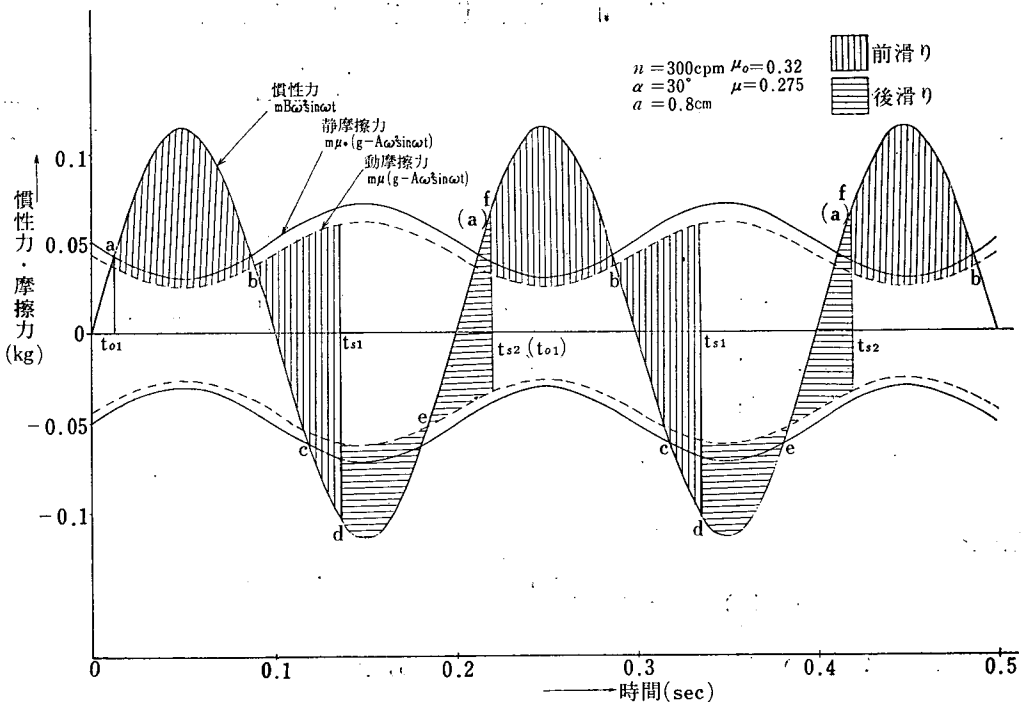


図 5 慣性力と摩擦力の関係 (模造紙接着板の場合)

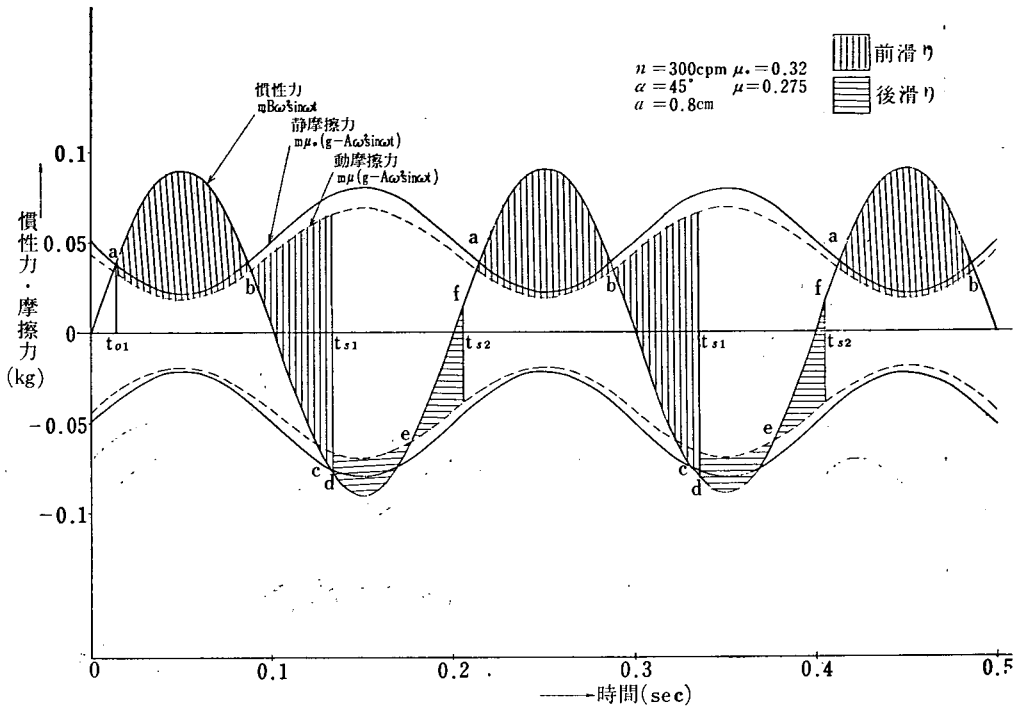


図 6 慣性力と摩擦力の関係（模造紙接着板の場合）

$\mu=0.275$ として、さきに1.2節(a)で述べた滑り運動の理論式を用い、物体に作用する慣性力と摩擦力を計算し、その時間に対する変化状態を図示すると図5、6のようになる。ただし、この場合の輸送板の運転条件は次のようにとった。

$n=300\text{cpm}$ （最大垂直加速度 $0.403g$ ）

$\alpha=30^\circ$ （図5の場合）、 45° （図6の場合）

$a=0.8\text{cm}$

また、輸送板に対する物体の摩擦係数を $\mu_0=0.74$ 、 $\mu=0.511$ とし、 $n=300\text{cpm}$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $a=0.8\text{cm}$ の条件について計算した結果は図7に示す。

次にこれらの図から物体の運動機構を説明する。

はじめ、原点0において物体は板上に静止しているものと仮定する。時刻 t_{01} (a点) にくると物体に働く慣性力が静摩擦力に打勝つために、物体は前方に滑り始め、時刻 t_{01} 以後は慣性力と摩擦力の差によって前方に加速される。このようにしてb点にくると、前方加速力は零となり後方に加速する力を受けることになるから、時刻 t_{s1} (d点) において前滑り運動は停止する。しかし、d点は慣性力と静摩擦力が等しくなる時刻 t_{02} (c点) をすでに過ぎているうえ、慣性力が静摩擦力より大きいから、前滑り運動の停止と同時に慣性力の働く方向すなわち、後滑りの方向に滑り始める。したがって、この場合は式(5)中の時刻 t_{02} は t_{s1} で置き換えられることになる。（後滑りの式では $\frac{\pi}{\omega}$ の時刻を時間の原点としたので $t_{02}=t_{s1}-\frac{\pi}{\omega}$ となる）

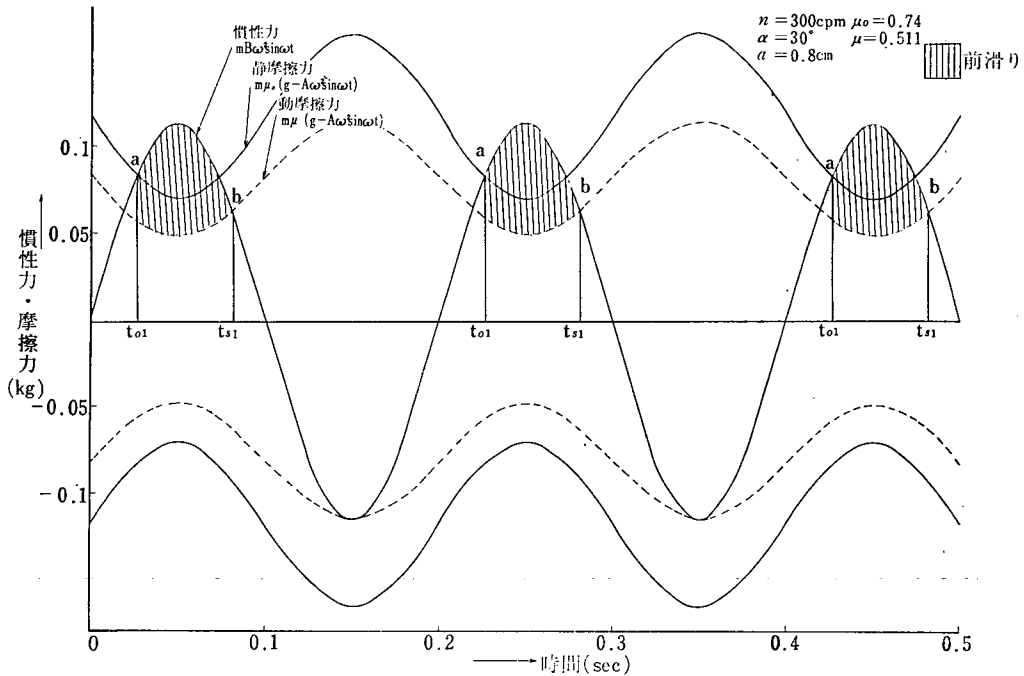


図 7 慣性力と摩擦力の関係 (合成ゴム接着板の場合)

次に、e 点において後滑り加速度は零となり、さらに e 点を越えると後滑り運動を止める方向の力を受けるから、時刻 t_{s2} (f 点) において後滑り運動は停止する。時刻 t_{s2} は次の周期の原点を $t=0$ とすれば、 $t_{01}(=t_2 - \frac{\pi}{\omega})$ となる。図 5 の場合には前と同様に、f 点はすでに慣性力と静摩擦力が等しくなる点を過ぎており、しかも慣性力の方が大きいので後滑りの停止と同時に前滑り運動を開始する。

いままでは原点 0 において板に対して静止していた物体が、時刻 t_{01} になってはじめて前滑り運動を開始するという条件で解析を進めてきたが、図 5 から明らかのように、輸送板振動の第 2 周期では 2 回目の運動に対する原点および時刻 t_{01} までは、物体はまだ後滑り運動を行っているから、1 回目の運動の場合の初期条件とは異なった初期条件を用いて理論式を解かなければならなくなってくる。しかし、輸送板の何周期目かの振動後には、 t_{s2} 時すなわち、次の周期の t_{01} 時がほぼ一定値に収束して、物体運動は安定軌道に入ることになる。そこで、本報では、物体の運動軌跡ならびに輸送速度の理論計算はすべて、このような収束時の時刻 t_{01} 、 t_{s1} 、 t_{s2} を用いて行なった。

図 5～7 における、慣性力と動摩擦力曲線の各時点における差異は、その時点の物体を加速あるいは減速する力を示すことはすでに述べた。そこで、このような各時点の差力を求め、これを物体質量 $\frac{W}{g}$ で割れば物体の水平方向加速度 \ddot{x} が求められ、これをさらに図式積分すれば \dot{x} が求められ、これをさらに図式積分すれば滑り距離 x を求められることになる。1 例として図 8 は、図 5 の場合に対して図式積分法を用いて求めた x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} の時間に対する変化状態を示す。

4.2 輸送板の最大垂直加速度が g をこえる場合

輸送板に対する物体の摩擦係数を $\mu_0 = 0.32$, $\mu = 0.275$ とし, 輸送板運転条件 $n = 600 \text{ cpm}$, $\alpha = 30^\circ$, $a = 0.8 \text{ cm}$ の場合に対して計算した物体慣性力と摩擦力との関係は図9に示す。ここで, 物体の運動状態を図によって説明すれば, はじめ原点0で物体は板に対して静止しているものと仮定すると, 時刻 t_{01} すなわち a 点において前滑り運動をはじめ, 時刻 $t_{1'}$ (b 点) で板を離れて放物線を描いて飛行し, 時刻 $t_{s1'}$ (d 点) で板上に落下する。物体は落下と同時に前滑り運動を生じ, 時刻 $t_{s2'}$ (e 点) にくるとこのような前滑り運動は零となる。この点では物体に働く慣性力が静摩擦力より大きいから, 物体はただちに後滑り運動を開始して時刻 t_{s3} (f 点) において静止する。 t_{s3} 時刻は, 次の周期に対する時刻 t_{01} (a 点) となるが, この点においてただちに前滑り運動に転じ, さらに, 時刻 $t_{1'}$ (b 点) において再び空中に放出される。このように物体がとび上る場合においても, 前と同様に2回目の運動の初期条件は1回目の運動に対する初期条件とは異なるが, 輸送板の振動の何周期目かになると t_{s3} 時

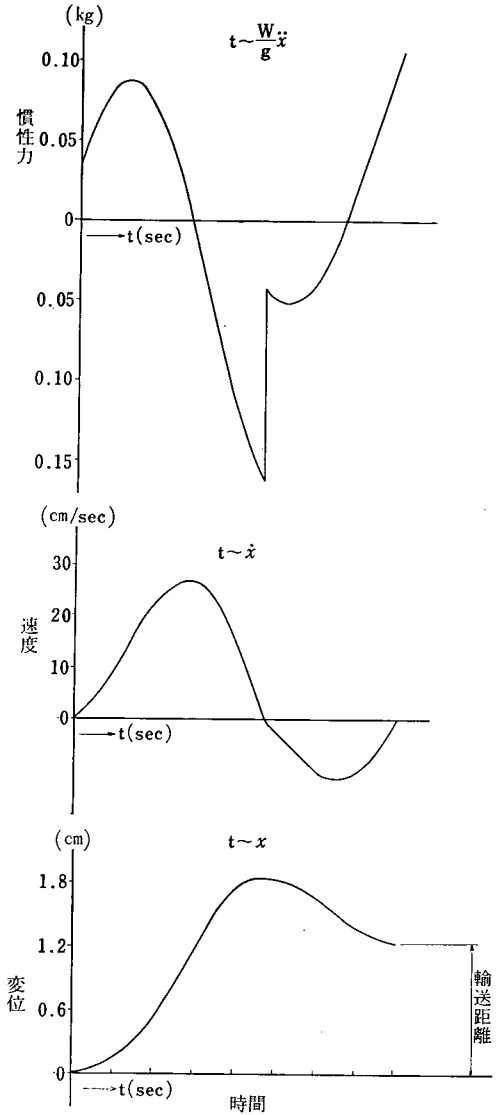


図8 時間に対する慣性力, 速度, 変位曲線

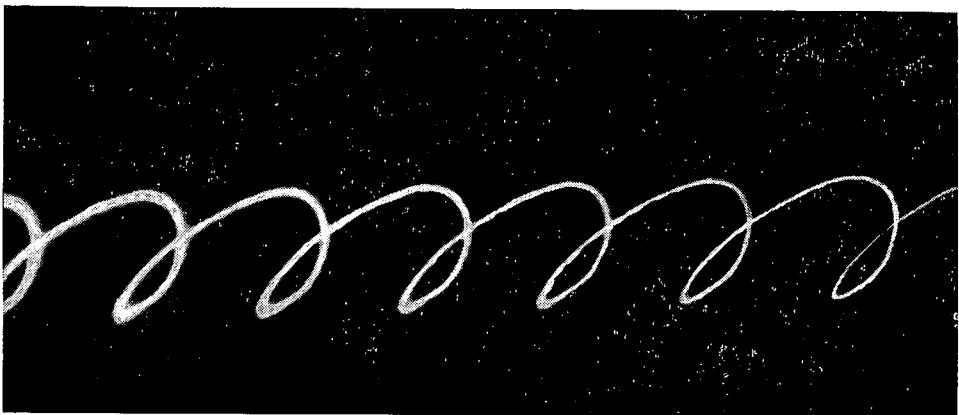


図10 (a) $n = 250 \text{ cpm}$, $\text{pitch} = 0.925 \text{ cm}$

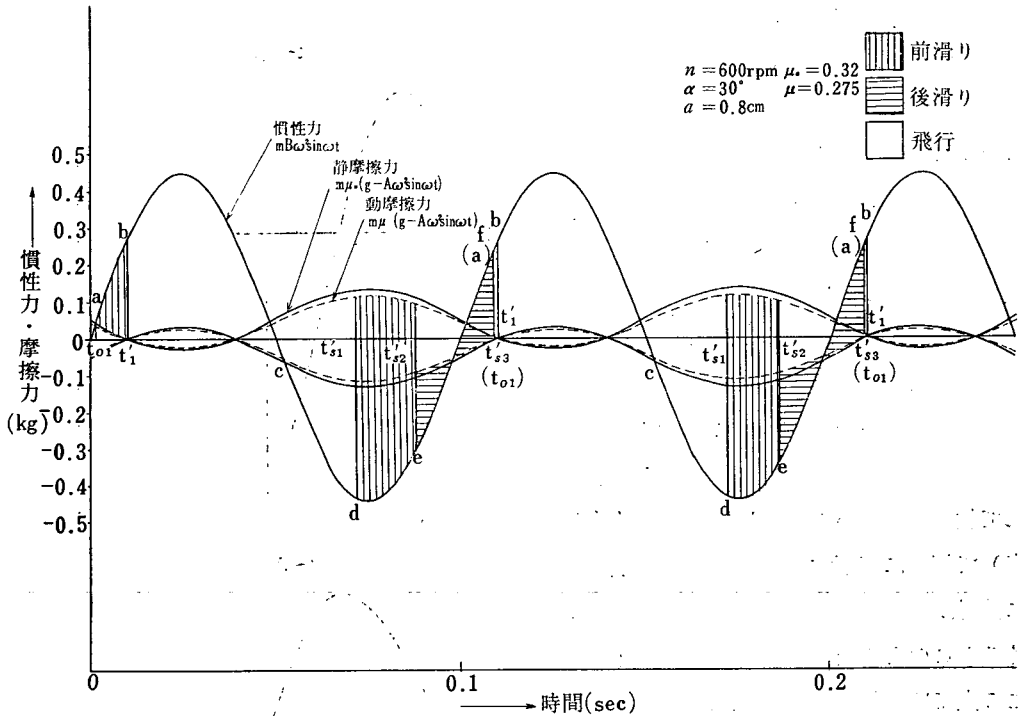


図 9 慣性力と摩擦力の関係（模造紙接着板の場合）

刻はほぼ一定した値に収束して、物体の運動は安定軌道に入るようになるのである。

5. 輸送物体の運動軌跡

種々の実験条件における輸送物体の運動軌跡の記録結果は図10～14に示す。ところで前節までに述べてきた理論式ならびにその数値計算結果はすべて板に対する相対運動だけを取扱って

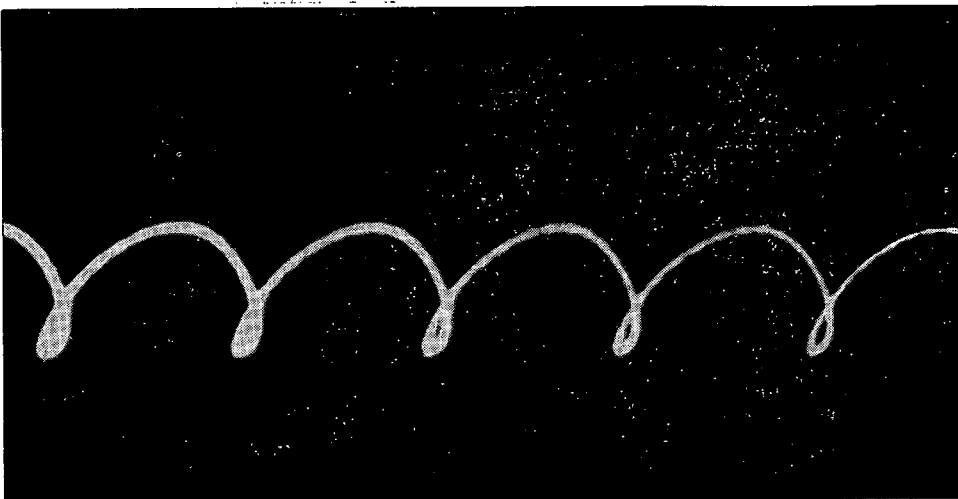


図10 (b) $n=300$ cpm, pitch=1.25cm

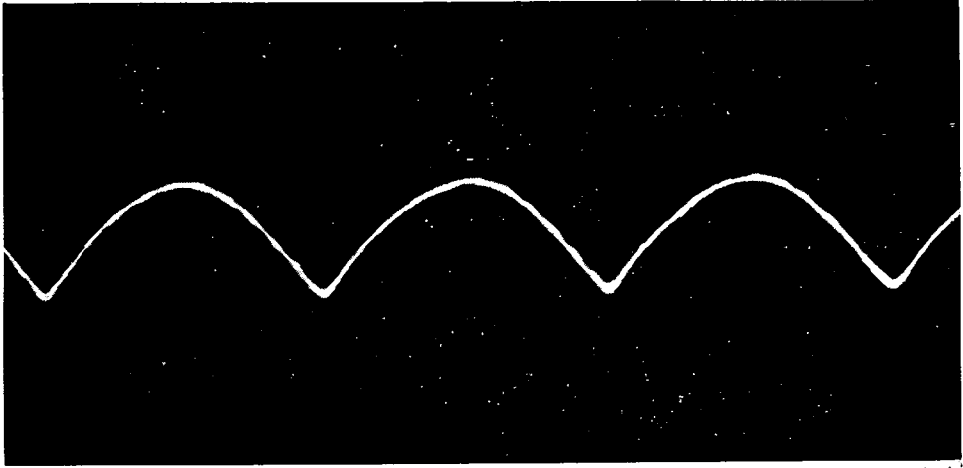


図10 (c) $n=450$ cpm, pitch=1.95cm

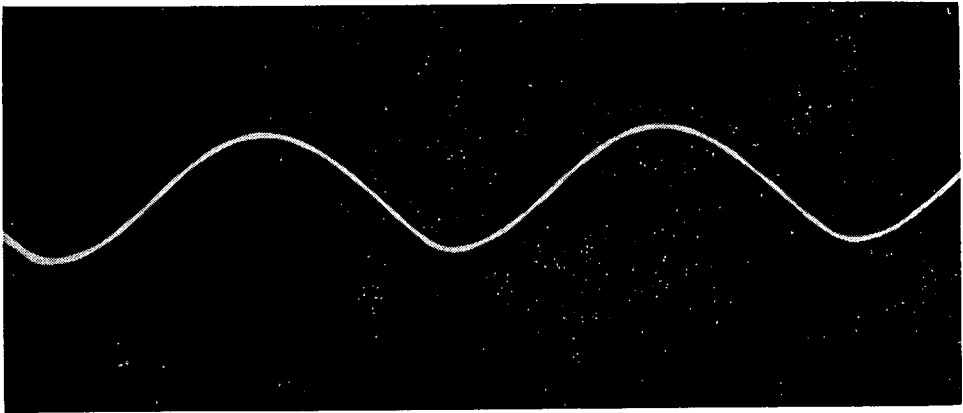


図10 (d) $n=600$ cpm, pitch=3.0cm

図10 輸送物体の運動の軌跡 (模造紙接着板の場合) ($\alpha=30^\circ, \mu_o=0.32, \mu=0.275, a=0.8$ cm)

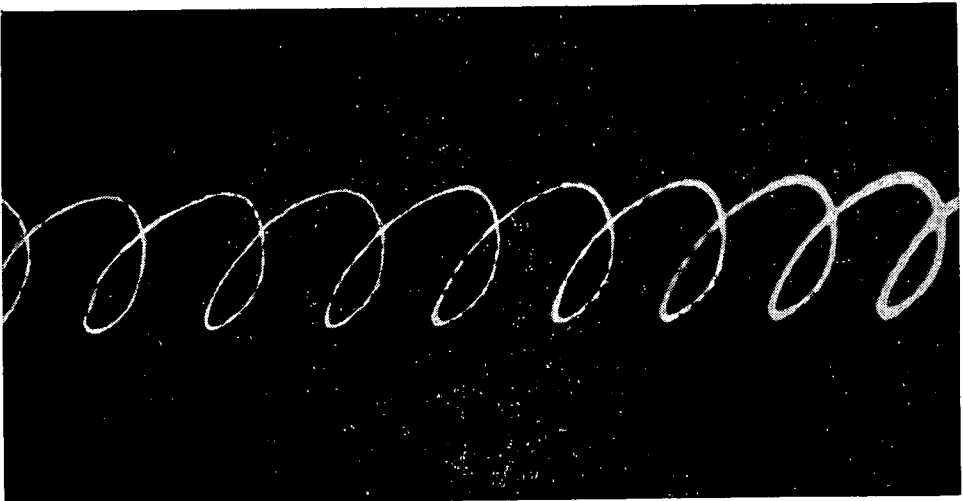


図11 (a) $n=250$ cpm, pitch=0.8cm

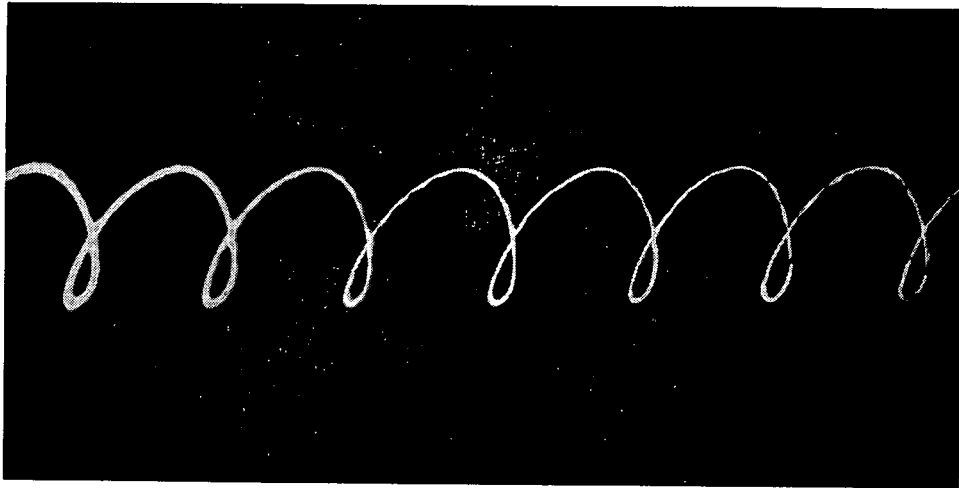


図11 (b) $n=300$ cpm, pitch=0.975cm

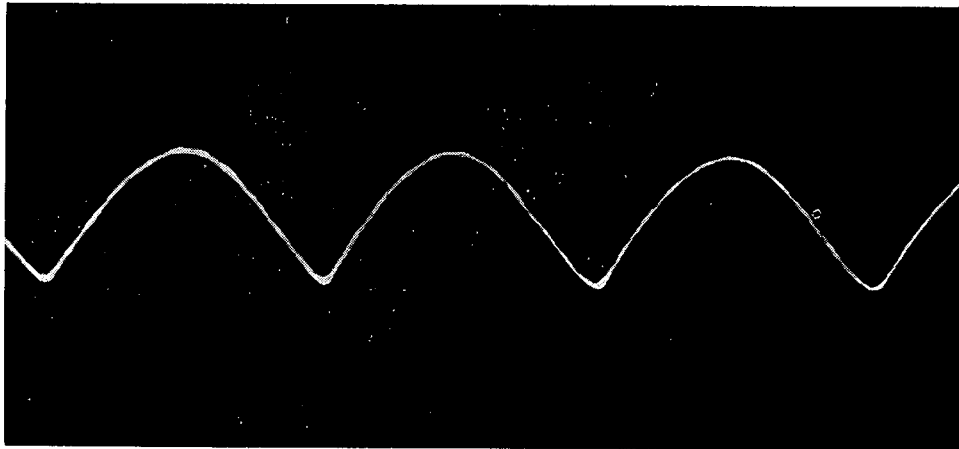


図11 (c) $n=450$ cpm, pitch=1.95cm

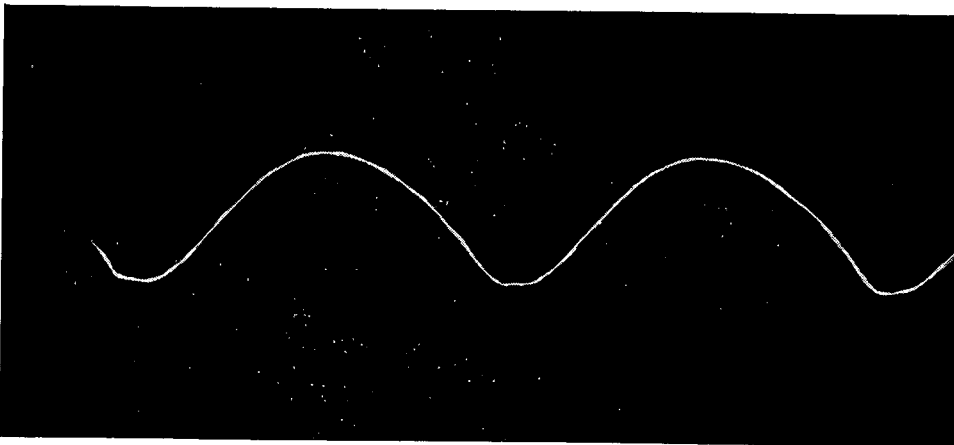


図11 (d) $n=600$ cpm, pitch=2.8cm

図11 輸送物体の運動の軌跡 (模造紙接着板の場合) ($\alpha=35^\circ, \mu_o=0.32, \mu=0.275, a=0.8\text{cm}$)

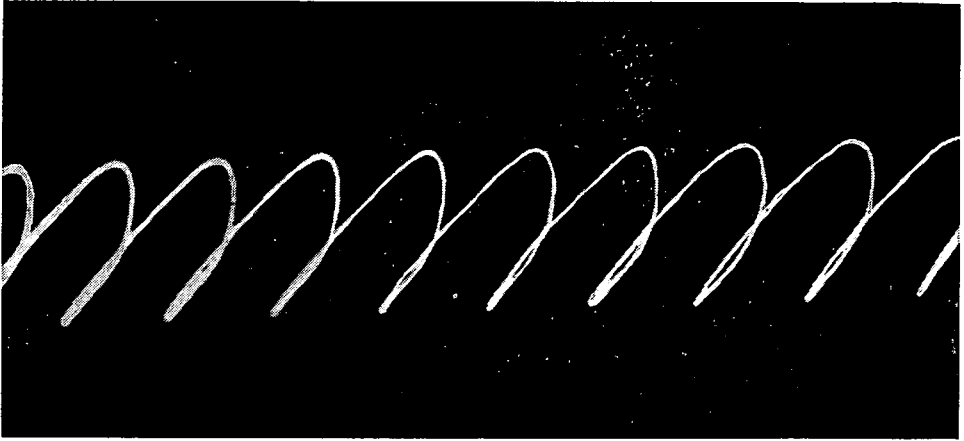


図12 (a) $n=250$ cpm, pitch=0.75cm

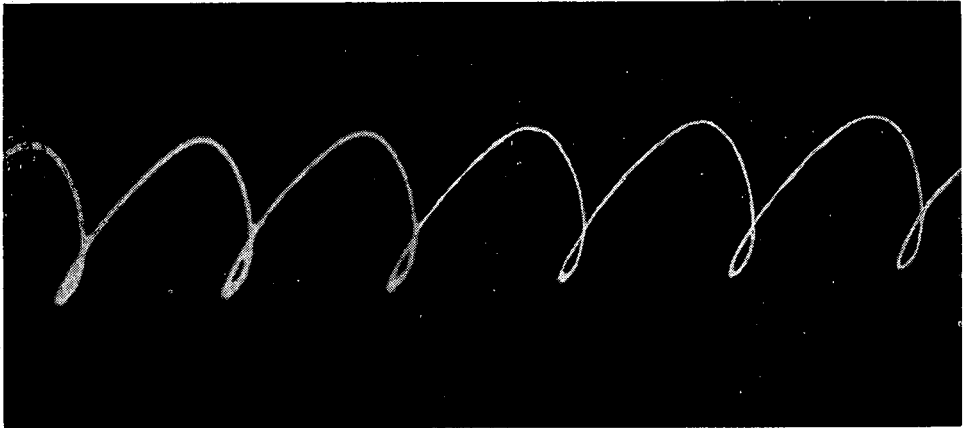


図12 (b) $n=300$ cpm, pitch=1.225cm

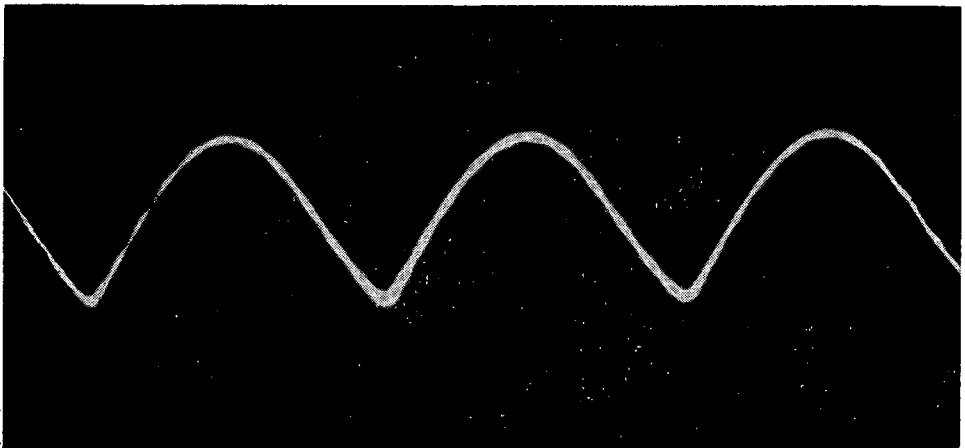


図12 (c) $n=450$ cpm, pitch=2.175cm

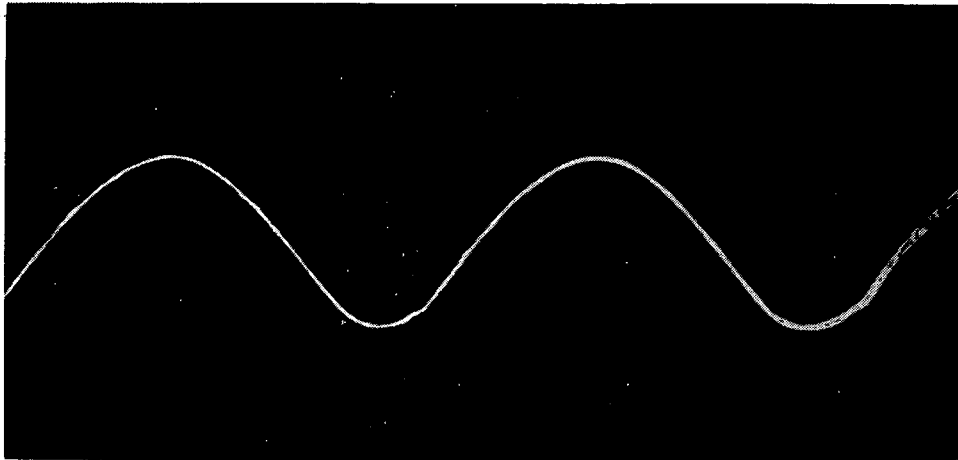


図12 輸送物体の運動の軌跡 (模造紙接着板の場合) ($\alpha=45^\circ, \mu_o=0.32, \mu=0.275, a=0.8\text{cm}$)



図13 (a) $n=300 \text{ cpm, pitch}=0.85\text{cm}$



図13 (b) $n=450 \text{ cpm, pitch}=2.5\text{cm}$

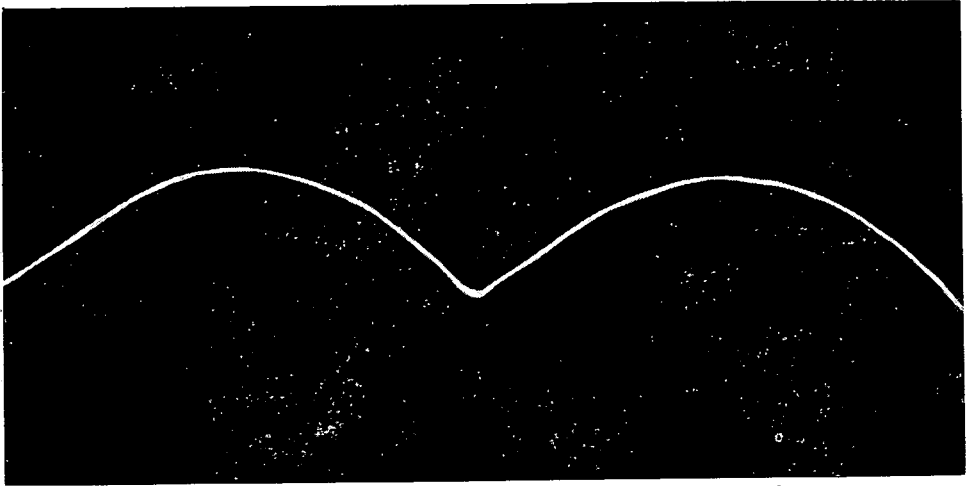


図13 (c) $n=600$ cpm, pitch=3.4cm

図13 輸送物体の運動の軌跡 (合成ゴム接着板の場合) ($\alpha=30^\circ, \mu_0=0.74, \mu=0.511, a=0.8$ cm)

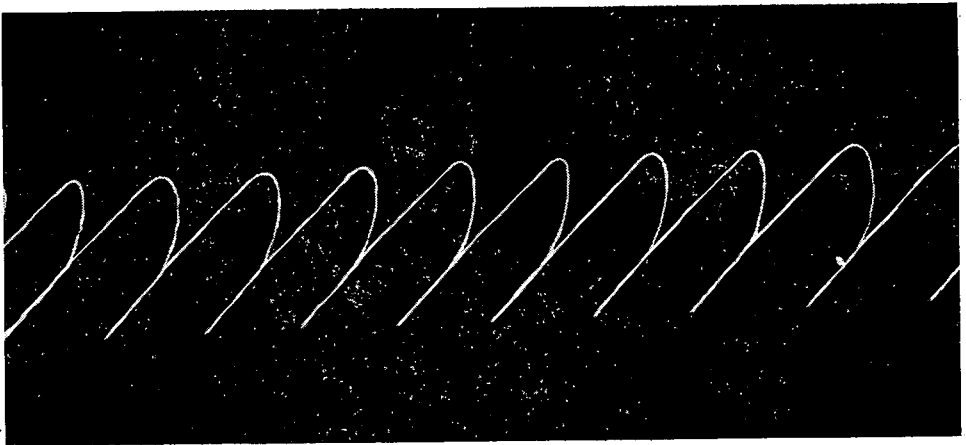


図14 (a) $n=300$ cpm, pitch=0.675cm

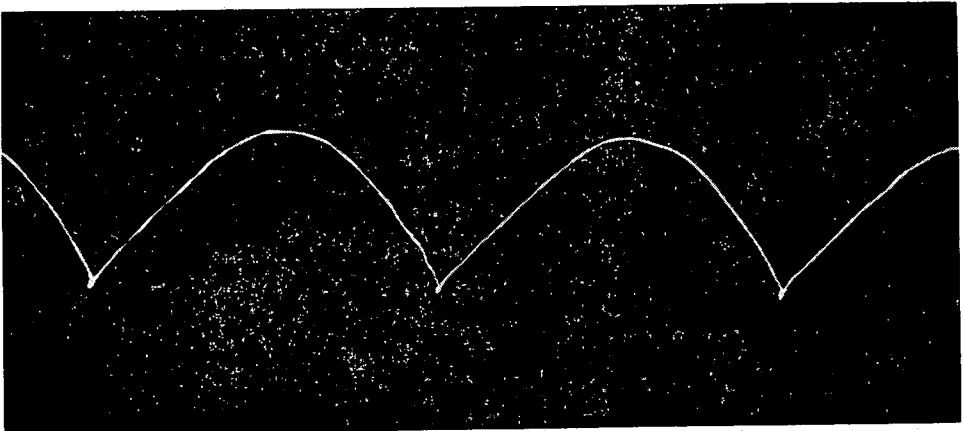


図14 (b) $n=450$ cpm, pitch=2.55cm

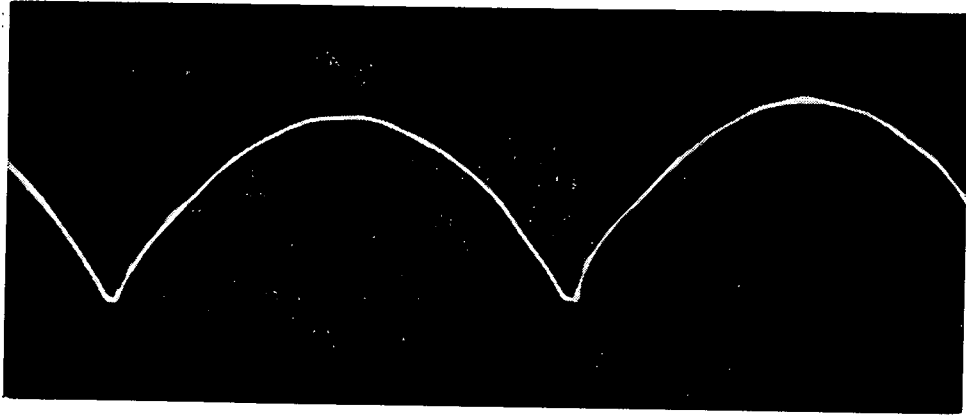

 図14 (c) $n=550 \text{ cpm}$, $\text{pitch}=3.4 \text{ cm}$

図14 輸送物体の運動の軌跡 (合成ゴム接着板の場合) ($\alpha=45^\circ, \mu_0=0.74, \mu=0.511, a=0.8 \text{ cm}$)

いた。しかし、本節で述べる物体の運動軌跡の記録結果には、輸送板の振動軌跡も包含された形状が現われる。すなわち、輸送板の最大垂直加速度が重力の加速度 g 以下の場合には、各時点における物体の水平方向の滑り運動と輸送板の振動とが合成された形状が現われる。また、輸送板の最大垂直加速度が重力の加速度をこえる場合には、物体が板上を滑っている間は前と同様、滑り運動と輸送板の振動とが合成された形状の物体運動軌跡となるが、物体が板からとび上って飛行している間は輸送板とは無関係な形状の運動軌跡が現われる。

輸送板に模造紙を接着し α を $30^\circ \sim 45^\circ$ に変化した場合のさきの記録結果図 10~12 を見ると、輸送板の振動数 250 cpm および 300 cpm において軌跡はその下方でループを描いており、これより物体は後滑り運動を生じていることがよくわかる。しかし、 α が 45° の場合の時 α が 30° の場合に比べてループが小さく、すなわち後滑り量は少ない。このことは図 5 と図 6 を比較してみると、 α が 30° の場合に比べて 45° の場合の方が後滑り方向の加速力が小さく、しかもまた加速時間も短いことから理解することができる。また、振動数 300 cpm の場合の物体の運動軌跡の理論計算結果は図 15, 16 に示す。これらを記録した軌跡と比較してみると、いずれもその pitch (1 周期中の前進距離を 1 pitch と呼ぶ) ならびに形状とも非常によく一致していることがわかる。

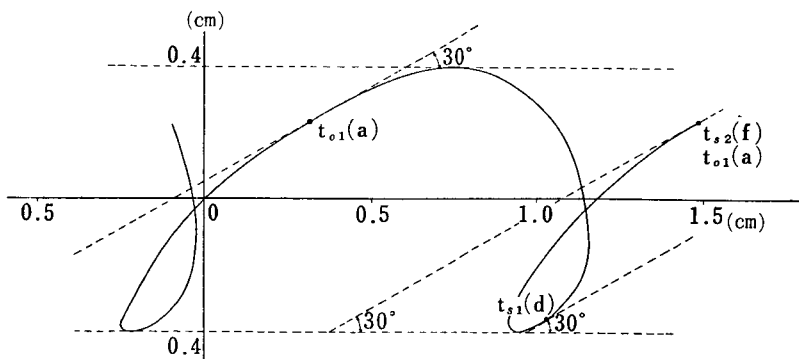


図15 理論計算による物体の運動軌跡 (模造紙接着板の場合)

$n=300 \text{ cpm}$ $\alpha=30^\circ$ $\mu_0=0.32$ $\mu=0.275$ $a=0.8 \text{ cm}$

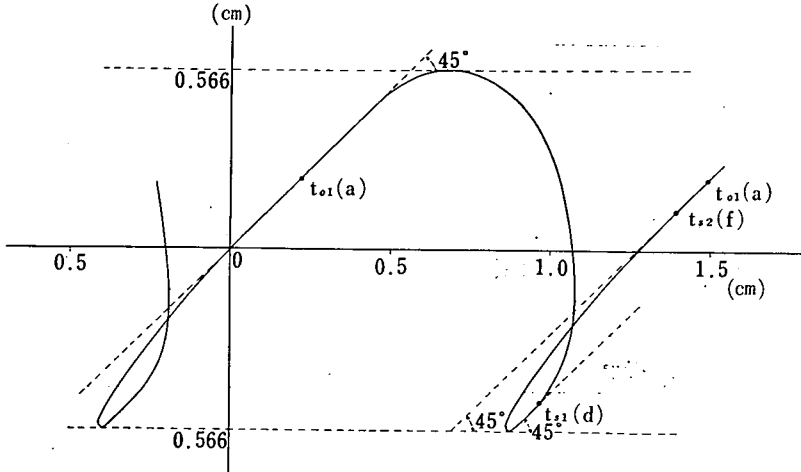


図16 理論計算による物体の運動軌跡（模造紙接着板の場合）

$$n=300\text{cpm} \quad \alpha=45^\circ \quad \mu_0=0.32 \quad \mu=0.275 \quad a=0.8\text{cm}$$

次に、輸送板に合成ゴム板を接着した場合については図13, 14から明らかなように、輸送板の振動数 250cpm では滑り運動はほとんど起らない。また振動数 300cpm では後滑り運動は無く、前滑り運動と輸送板の振動を合成した形状となっている。このことは図7から明らかなように、後滑り運動を生ずる可能性のある時刻 $\frac{\pi}{\omega} \sim \frac{2\pi}{\omega}$ の間で摩擦力が慣性力よりつねに大となっており、したがって後滑り運動は発生しえないということから説明できる。また振動数が300 cpm, α が 30° および 45° の場合の物体の運動軌跡の理論計算結果は図17, 18に示す。これらはいずれも図13, 14に示す記録結果とその pitch ならびに形状ともに極めてよく一致していることがわかる。

輸送板の振動数が 450cpm 程度になると、一般的に物体の前滑り量はかなり増大するが、後滑り量はそれほど増大しないため、もはや軌跡中にループは現われないのがふつうである。特に合成ゴム接着板の場合には、振動数 450cpm でほとんど物体の後滑り運動を生じないため、模造紙接着板の場合に比べて運動軌跡の形状は横方向に増大し、また pitch も約 4mm 程度大

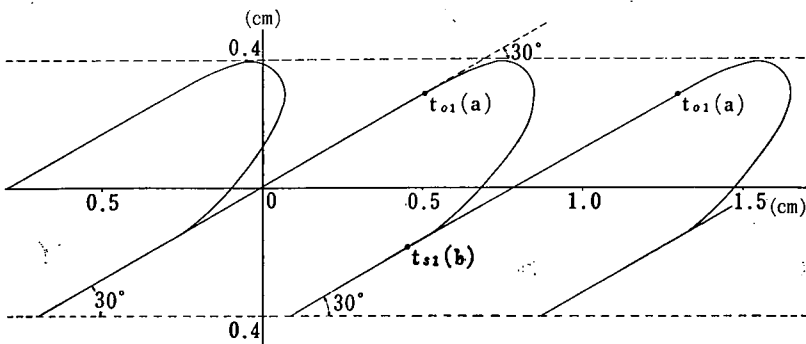


図17 理論計算による物体の運動軌跡（合成ゴム接着板の場合）

$$n=300\text{cpm} \quad \alpha=30^\circ \quad \mu_0=0.74 \quad \mu=0.511 \quad a=0.8\text{cm}$$

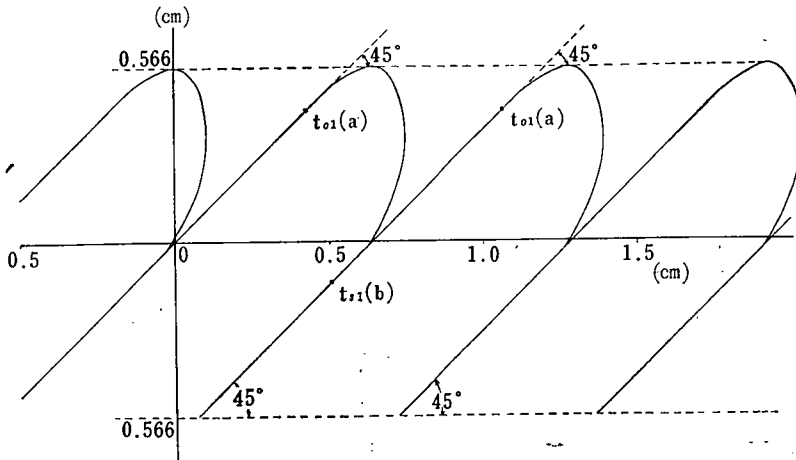


図18 理論計算による物体の運動軌跡（合成ゴム接着板の場合）

$$n=300\text{cpm} \quad \alpha=45^\circ \quad \mu_0=0.74 \quad \mu=0.511 \quad a=0.8\text{cm}$$

きく現われる。これは合成ゴム使用の場合、模造紙の場合に比べて物体との間の摩擦係数が相当大きくなるためであり、摩擦係数が大きければ理論式から明らかなように、前滑り距離 S_1 は大きく、一方、後滑り距離 S_2 は小さくなることから理解できると考える。

さらに、振動数が600cpm 程度になると、限界振動数（ α が 30° の場合限界振動数 n_c は473 cpm, α が 45° の場合 n_c は 398cpm となる）を超えているゆえ物体はとび上り運動を行っており、飛行している間の軌跡は明らかに放物線となっている。

模造紙接着板を用い α が 30° の場合についての運動軌跡の理論計算結果は図19に示す。これより t_1' から t_{s1}' までの間、物体は板から離れて飛行運動をしていることがわかる。また、1 pitch のうちの大部分が飛行距離で占められていることもわかる。飛行中はもちろん輸送板による摩擦抵抗はないから、滑り運動だけで運動する場合より 1 pitch の長さ、すなわち、物体の前進距離はかなり増大する。図19の理論軌跡を図10の記録結果と比較してみると、形状はほぼ一致しているが、pitch は約 1.8mm 程度実験結果の方が小さくなっている。

次に模造紙接着板で α を 45° にした場合には、振動数 600cpm で物体のとび上り量は相当大きくなり、そのため物体は転倒したりしてその運動は極めて不規則となり実験的に軌跡を

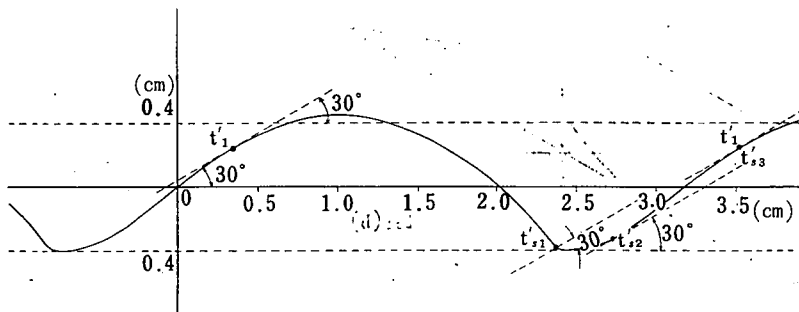


図19 理論計算による物体の運動軌跡（模造紙接着板の場合）

$$n=600\text{cpm} \quad \alpha=30^\circ \quad \mu_0=0.32 \quad \mu=0.275 \quad a=0.8\text{cm}$$

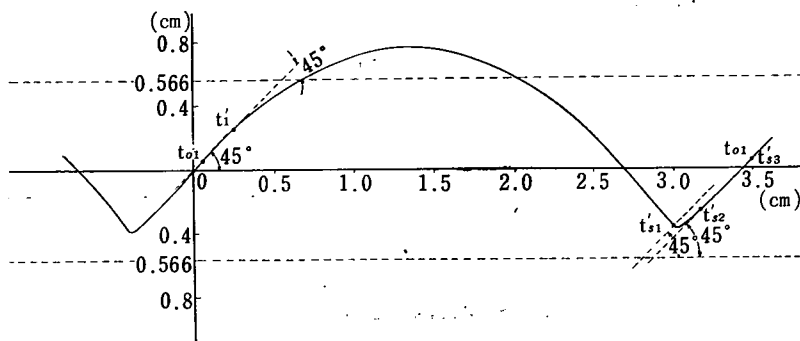


図20 理論計算による物体の運動軌跡（模造紙接着板の場合）

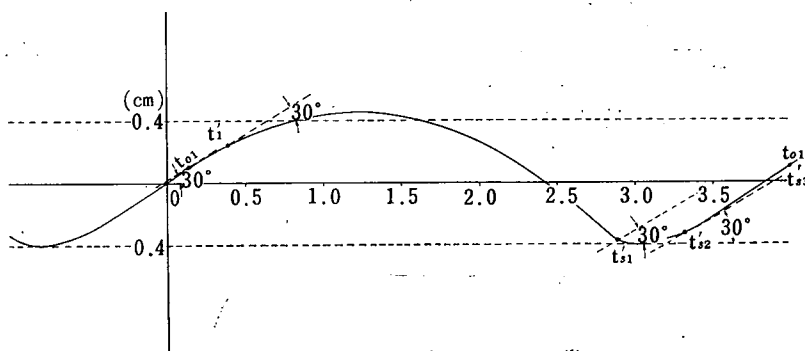
 $n=600\text{cpm}$ $\alpha=45^\circ$ $\mu_0=0.32$ $\mu=0.275$ $a=0.8\text{cm}$


図21 理論計算による物体の運動軌跡（合成ゴム接着板の場合）

 $n=600\text{cpm}$ $\alpha=30^\circ$ $\mu_0=0.74$ $\mu=0.511$ $a=0.8\text{cm}$

撮影することは不可能であった。そこで、 α が 45° の場合については振動数を 550cpm にして軌跡の撮影を行なった。それゆえ、直接の比較はできなかったが参考までに振動数が 600cpm の場合の理論軌跡を図20に示す。

次に、合成ゴム接着板を用い α が 30° の場合についての理論軌跡は図21に示す。これを図13(c)の記録結果と比較してみると、物体が飛行している間は理論と記録結果はほとんど一致している。しかし物体が板上に落下した後、理論上はかなりの前滑り運動を生ずる軌跡となっているのに、記録結果の軌跡には前滑り運動がほとんど現われていない。これは恐らく物体が合成ゴム板上に落下した際、ゴムに変形を生じて物体が喰い込み、物体はほとんど滑れなくなることが原因しているものと推察される。

6. 輸送速度について

輸送板の種々の作動条件における輸送物体の運動の pitch ならびに輸送速度を前述した理論式を用いて計算した結果は表3、4に示す。ここで表3は、物体が輸送板に対して滑り運動のみを行ないながら前進する場合について計算した結果であり、表4は物体がとび上り運動を行なう場合について計算した結果である。

図22は輸送板に模造紙を接着した場合と合成ゴムを接着した場合とについて、 α が 30° に

表 3 収束時の時間および各種条件のもとでの pitch および輸送速度の計算値

 $n=300\text{cpm}$ の場合

 $n=450\text{cpm}$ の場合

α 接着板の 種類	30°		45°		30°	
	模造紙	合成ゴム	模造紙	合成ゴム	模造紙	合成ゴム
最大垂直加速度 (g)	0.4	0.4	0.57	0.57	0.906	0.906
t_{01} (sec)	0.0201	0.0267	0.01397	0.0268	0.0210	0.0104
t_{s1} (sec)	0.136	0.1155	0.1328	0.1077	0.1007	0.0968
t_{s2} (sec)	0.2201	0	0.2047	0	0.0877	0.1438
$t_{01}-t_{s1}$ までの前滑り距離 S_1 (cm)	1.756	0.788	1.460	0.645	2.716	2.855
$t_{s1}-t_{s2}$ までの後滑り距離 S_2 (cm)	0.572	0	0.194	0	0.634	0.335
Pitch (cm)	1.184	0.788	1.266	0.645	2.082	2.520
輸送速度 (cm/sec)	5.920	3.940	6.330	3.225	15.61	18.90
安定軌道に入るまでの周期数	3	1	3	1	5	3

 (t_{01}, t_{s1}, t_{s2} は収束時の原点からの時間を示す。)

表 4 収束時の時間および各種条件のもとでの pitch および輸送速度の計算値

 $n=450\text{cpm}$
 $n=550\text{cpm}$
 $n=600\text{cpm}$ の場合

の場合

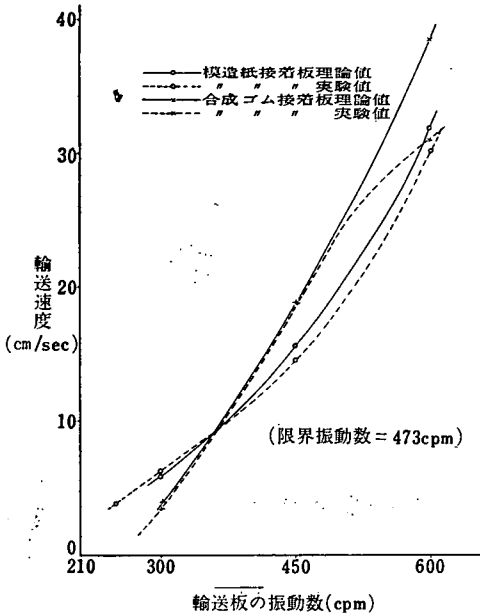
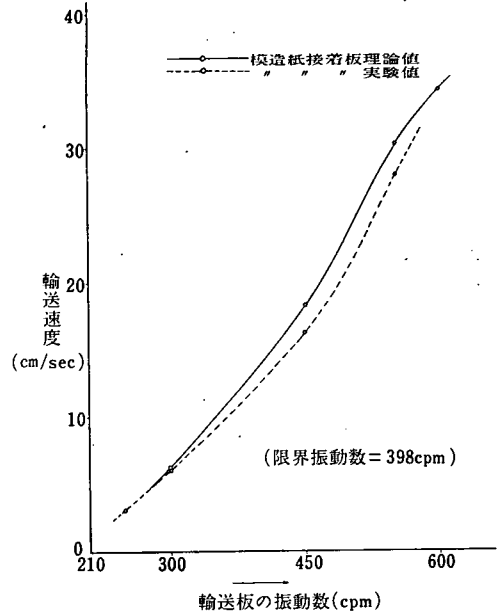
の場合

α 接着板の 種類	45°	45°	30°		45°
	模造紙	模造紙	模造紙	合成ゴム	模造紙
最大垂直加速度 (g)	1.28	1.91	1.59	1.59	2.24
t_{01} (sec)	0.0133	0.00515	—	0.004	0.0024
$t_{1'}$ (sec)	0.01898	0.00959	0.01067	0.01067	0.00721
$t_{s1'}$ (sec)	0.07825	0.0871	0.0721	0.0721	0.0880
$t_{s2'}$ (sec)	0.1051	0.0967	0.0847	0.0845	0.0924
$t_{s3'}$ (sec)	0.1467	0.1142	0.1114	0.1040	0.1024
$t_{01}-t_{1'}$ までの前滑り距離 (cm)	0.00434	0.0067	—	0.0194	0.00432
$t_{1'}-t_{s1'}$ までの相対飛行距離(cm)	2.010	3.227	3.1152	3.5122	3.4183
$t_{s1'}-t_{s2'}$ までの前滑り距離 (cm)	0.4485	0.1105	0.2649	0.3595	0.0368
$t_{s2'}-t_{s3'}$ までの後滑り距離 (cm)	0.2153	0.0352	0.1982	0.0431	0.0314
V (cm/sec)	21.6	31.2	33.5	41.0	34.6
V' (cm/sec)	44.4	21.65	41.9	50.49	8.64
Pitch (cm)	2.444	3.309	3.182	3.848	3.428
輸送速度 (cm/sec)	18.35	30.332	31.82	38.48	34.28
安定軌道に入るまでの周期数	3	4	6	3	4

 ($t_{01}, t_{1'}, t_{s1'}, t_{s2'}, t_{s3'}$ は収束時の原点からの時間を示す。)

おける振動数と輸送速度との関係を、表 3, 4 に示した理論値と測定した実験値とを比較した結果を示す。これより合成ゴム接着板を使用した場合であって、しかも振動数が約 500cpm 以上の高速においては、理論と実験値に相当大きな差異がみられたが、それ以外では傾向的にも数値的にもかなり良い一致がみられた。

また、図23は模造紙接着板で α が 45° における輸送速度の理論値と実験値を比較したものであって、理論速度の方が若干高く計算されたが、振動数に対する輸送速度の傾向はかなり良

図22 物体の輸送速度 ($\alpha=30^\circ$ の場合)図23 物体の輸送速度 ($\alpha=45^\circ$ の場合)

く一致しているといえるように考える。

7. む す び

振動輸送中の輸送物体の挙動を調べるために、輸送中における物体の運動軌跡の撮影ならびに輸送速度の測定を行ない、理論式から求めた物体の運動軌跡や輸送速度と比較検討を行なった。

その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 輸送板の振動数が限界振動数以下の比較的小さい範囲であって、輸送板上の物体が滑り運動だけを行なう場合では、理論軌跡と記録した運動軌跡とはよく一致することがわかった。
- (2) 輸送板の振動数が限界振動数を超え、物体がとび上り運動を生ずるようになると、理論軌跡と記録した運動軌跡は形状的には相似しているが、pitch に若干の差異を生ずる結果が得られた。

(3) 理論式より物体に働く慣性力、摩擦力の時間的変化を求め、これより輸送物体の運動機構をしらべ、さらに運動軌跡の解明を試みた。

(4) 輸送速度の理論値と実験値を比較した結果、本研究の条件下では、合成ゴム接着板を使用して振動数が約 500cpm 以上の場合のほかは、傾向的にも数値的にもかなりよく一致することがわかった。

(5) 上記のような合成ゴム接着板を用いた場合の理論と実験値との差異は、ゴムの変形による物体の喰い込みが原因しているものと考えた。このことは、物体が板上に落下した後、理論上からいえば前滑り運動を生ずる筈のものが、記録した軌跡にはほとんどそれが現われていな

いことから推察された。

終りにのぞみ、本研究に終始熱心に協力して実験ならびに計算を遂行してくれた山賀良宏、高富邦博の両君に心から厚く感謝の意を表します。

参 考 資 料

- 1) 牧野：応用物理, 30, (12), 879～(1961)
- 2) 松本：機学誌, 63, (499), 1162～(1960)
- 3) 谷口, 他：機学論文集 38, (188), 485～(昭37.4)
- 4) 井沢, 松村：明治大学科研紀要 第4冊, 59～(昭40)